

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日                      2 0 0 4 年    5 月 2 1 日  
Date of Application:

出 願 番 号                      特 願 2 0 0 4 - 1 5 2 3 0 8  
Application Number:  
[ST. 10/C] :                      [ J P 2 0 0 4 - 1 5 2 3 0 8 ]

出      願      人                      京セラ株式会社  
Applicant(s):

REC'D 26 NOV 2004

WIPO

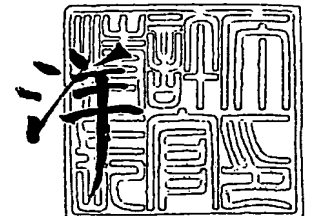
PCT

PRIORITY DOCUMENT  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH  
RULE 17.1(a) OR (b)

2 0 0 4 年    7 月 2 2 日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

小 川



【書類名】 特許願  
【整理番号】 0000351181  
【提出日】 平成16年 5月21日  
【あて先】 特許庁長官殿  
【国際特許分類】 H01L 41/08  
【発明者】  
    【住所又は居所】 鹿児島県国分市山下町 1 番 1 号 京セラ株式会社鹿児島国分工場内  
    【氏名】 岡村 健  
【発明者】  
    【住所又は居所】 鹿児島県国分市山下町 1 番 4 号 京セラ株式会社総合研究所内  
    【氏名】 坂上 勝伺  
【特許出願人】  
    【識別番号】 000006633  
    【住所又は居所】 京都府京都市伏見区竹田鳥羽殿町 6 番地  
    【氏名又は名称】 京セラ株式会社  
    【代表者】 西口 泰夫  
【先の出願に基づく優先権主張】  
    【出願番号】 特願2003-369689  
    【出願日】 平成15年10月29日  
【手数料の表示】  
    【予納台帳番号】 005337  
    【納付金額】 16,000円  
【提出物件の目録】  
    【物件名】 特許請求の範囲 1  
    【物件名】 明細書 1  
    【物件名】 図面 1  
    【物件名】 要約書 1

**【書類名】 特許請求の範囲****【請求項 1】**

少なくとも 1 つの圧電体と複数の内部電極とを交互に積層してなる積層体を有し、該積層体の側面に前記内部電極が一層おきに交互に接続された一対の外部電極を具備し、該外部電極に電界を印加して駆動する積層型圧電素子において、連続駆動前後の素子変位量の変化率が 5 % 以内であることを特徴とする積層型圧電素子。

**【請求項 2】**

少なくとも 1 つの圧電体と複数の内部電極とを交互に積層してなる積層体を有し、該積層体の側面に前記内部電極が一層おきに交互に接続された一対の外部電極を具備し、該外部電極に電界を印加して駆動する積層型圧電素子において、連続駆動中の素子変位量の最大変化率が 5 % 以内であることを特徴とする積層型圧電素子。

**【請求項 3】**

少なくとも 1 つの圧電体と複数の内部電極とを交互に積層してなる積層体を有し、該積層体の側面に前記内部電極が一層おきに交互に接続された一対の外部電極を具備し、該外部電極に電界を印加して駆動する積層型圧電素子において、連続駆動前後の圧電体の厚み寸法変化率が 5 % 以内であることを特徴とする積層型圧電素子。

**【請求項 4】**

少なくとも 1 つの圧電体と複数の内部電極とを交互に積層してなる積層体を有し、該積層体の側面に前記内部電極が一層おきに交互に接続された一対の外部電極を具備し、該外部電極に電界を印加して駆動する積層型圧電素子において、連続駆動前後の素子抵抗の変化率が 5 % 以内であることを特徴とする積層型圧電素子。

**【請求項 5】**

少なくとも 1 つの圧電体と複数の内部電極とを交互に積層してなる積層体を有し、該積層体の側面に前記内部電極が一層おきに交互に接続された一対の外部電極を具備し、該外部電極に電界を印加して駆動する積層型圧電素子において、連続駆動中の素子抵抗の最大変化率が 5 % 以内であることを特徴とする積層型圧電素子。

**【請求項 6】**

前記内部電極中の金属組成物が V I I I 族金属および／または I b 族金属を主成分とすることを特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれかに記載の積層型圧電素子。

**【請求項 7】**

前記内部電極中の V I I I 族金属の含有量を M 1 (重量%)、I b 族金属の含有量を M 2 (重量%) としたとき、 $0 < M 1 \leq 15$ 、 $85 \leq M 2 < 100$ 、 $M 1 + M 2 = 100$  を満足することを特徴とする請求項 6 記載の積層型圧電素子。

**【請求項 8】**

前記 V I I I 族金属が N i、P t、P d、R h、I r、R u、O s のうち少なくとも 1 種以上であり、I b 族金属が C u、A g、A u のうち少なくとも 1 種以上であることを特徴とする請求項 6 または 7 に記載の積層型圧電素子。

**【請求項 9】**

前記 V I I I 族金属が P t、P d のうち少なくとも 1 種以上であり、I b 族金属が A g、A u のうち少なくとも 1 種以上であることを特徴とする請求項 6 乃至 8 のいずれかに記載の積層型圧電素子。

**【請求項 10】**

前記 V I I I 族金属が N i であることを特徴とする請求項 6 乃至 8 のいずれかに記載の積層型圧電素子。

**【請求項 11】**

前記 I b 族金属が C u であることを特徴とする請求項 6 乃至 8 のいずれかに記載の積層型圧電素子。

**【請求項 12】**

前記内部電極中に金属組成物とともに酸化物、窒化物または炭化物を添加したことを特徴とする請求項 1 乃至 11 のいずれかに記載の積層型圧電素子。

## 【請求項 13】

前記酸化物が  $\text{PbZrO}_3 - \text{PbTiO}_3$  からなるペロブスカイト型酸化物を主成分とすることを特徴とする請求項 12 記載の積層型圧電素子。

## 【請求項 14】

前記圧電体がペロブスカイト型酸化物を主成分とすることを特徴とする請求項 1 乃至 13 のいずれかに記載の積層型圧電素子。

## 【請求項 15】

前記圧電体が  $\text{PbZrO}_3 - \text{PbTiO}_3$  からなるペロブスカイト型酸化物を主成分とすることを特徴とする請求項 14 記載の積層型圧電素子。

## 【請求項 16】

前記積層体の焼成温度が  $900^\circ\text{C}$  以上  $1000^\circ\text{C}$  以下であることを特徴とする請求項 1 乃至 15 のいずれかに記載の積層型圧電素子。

## 【請求項 17】

前記内部電極中の組成のずれが焼成前後で 5 % 以下であることを特徴とする請求項 1 乃至 16 のいずれかに記載の積層型圧電素子。

## 【請求項 18】

前記積層体の側面に端部が露出する前記内部電極と端部が露出しない前記内部電極とが交互に構成されており、前記端部が露出していない前記内部電極と前記外部電極間の前記圧電体部分に溝が形成されており、該溝に前記圧電体よりもヤング率の低い絶縁体が充填されていることを特徴とする請求項 1 乃至 17 のいずれかに記載の積層型圧電素子。

## 【請求項 19】

噴射孔を有する収納容器と、該収納容器に収納された請求項 1 乃至 18 のいずれかに記載の積層型圧電素子と、該積層型圧電素子の駆動により前記噴射孔から液体を噴出させるバルブとを具備してなることを特徴とする噴射装置。

【書類名】明細書

【発明の名称】積層型圧電素子およびこれを用いた噴射装置

【技術分野】

【0001】

本発明は、積層型圧電素子および噴射装置に関し、例えば、自動車エンジンの燃料噴射装置、インクジェット等の液体噴射装置、光学装置等の精密位置決め装置や振動防止装置等に搭載される駆動素子、ならびに燃焼圧センサ、ノックセンサ、加速度センサ、荷重センサ、超音波センサ、感圧センサ、ヨーレートセンサ等に搭載されるセンサ素子、ならびに圧電ジャイロ、圧電スイッチ、圧電トランス、圧電ブレーカー等に搭載される回路素子に用いられる積層型圧電素子および噴射装置に関するものである。

【背景技術】

【0002】

従来より、積層型圧電素子としては、圧電体と電極を交互に積層した積層型圧電アクチュエータが知られている。積層型圧電アクチュエータには、同時焼成タイプと、圧電磁器と内部電極板を交互に積層したスタックタイプの２種類に分類されており、低電圧化、製造コスト低減の面から考慮すると、同時焼成タイプの積層型圧電アクチュエータが薄層化に対して有利であることと、耐久性に対して有利であることから、優位性を示しつつある。

【0003】

図１は、従来の積層型圧電素子を示すもので、圧電体１１と内部電極１２が交互に積層されているが、内部電極１２は圧電体１１主面全体には形成されておらず、いわゆる部分電極構造となっている。この部分電極構造の内部電極１２を左右互い違いに積層することで、積層型電子部品の側面に形成された外部電極１５に内部電極１２を一層おきに交互に接続することができる。セラミックグリーンシートに内部電極ペーストを所定の電極構造となるパターンで印刷し、この内部電極ペーストが塗布されたグリーンシートを複数積層して得られた積層成形体を作製し、これを焼成することによって、積層体を作製していた（例えば、特許文献１参照）。

【0004】

このような積層型圧電素子は、圧電体１１と内部電極１２が交互に積層されて柱状積層体１３が形成され、その積層方向における両端面には不活性層１４が積層されている。内部電極１２は、その一方の端部が左右交互に外部電極１５と左右各々一層起きに導通するように形成されている。積層型圧電アクチュエータとして使用する場合には、外部電極１５にさらにリード線を半田により接続固定されていた。

【0005】

また、内部電極としては、銀とパラジウムの合金が用いられ、さらに、圧電体と内部電極を同時焼成するために、内部電極の金属組成は、銀７０重量％、パラジウム３０重量％にして用いていた（例えば、特許文献２参照）。

【0006】

このように、銀のみの金属組成からなる内部電極ではなく、パラジウムを含む銀－パラジウム合金含有の金属組成からなる内部電極を用いるのは、パラジウムを含まない銀のみの組成では、一対の対向する電極間に電位差を与えた場合、その一対の電極のうちの正極から負極へ電極中の銀が素子表面を伝わって移動するという、いわゆるシルバー・マイグレーション現象が生じるからである。この現象は、高温、高湿の雰囲気中で、著しく発生していた。

【0007】

また、近年においては、小型の圧電アクチュエータで大きな圧力下において大きな変位量を確保するため、より高い電界を印加し、長時間連続駆動させることが行われている。

【特許文献１】特開昭６１－１３３７１５号公報

【特許文献２】実開平１－１３０５６８号公報

【発明の開示】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0008】

しかしながら、圧電体は使用する環境温度により変位量が増加する特性を有していることから、素子温度が上昇することで、圧電アクチュエータ変位量が増加する問題があった。また、変位量が増加中に増加することで電圧制御する電源に対する負荷変動が生じ、電源に負担をかける問題が生じていた。さらには、変位量の変化率が大いだと、変位量自体が急激に劣化するだけでなく、素子温度上昇が放熱量を上回ると熱暴走現象が生じて素子が破壊する問題があった。

## 【0009】

また、素子温度上昇を抑制するために、比抵抗の小さい内部電極が求められていた。しかしながら、銀-パラジウム合金の比抵抗値は、その組成比によって銀、またはパラジウム単体の比抵抗よりも著しく高い抵抗となり、銀70重量%、パラジウム30重量%の銀-パラジウム合金の組成では、パラジウム単体の1.5倍の抵抗になるという問題があった。しかも、内部電極の焼結密度が低くなれば、さらに高い抵抗になった。

## 【0010】

本発明は、高電圧、高圧力下で圧電アクチュエータを長期間連続駆動させた場合でも、変位量が増加することがなく、耐久性に優れた積層型圧電素子および噴射装置を提供することを目的とする。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0011】

本発明の積層型圧電素子は、少なくとも1つの圧電体と複数の内部電極とを交互に積層してなる積層体を有し、該積層体の側面に前記内部電極が一層おきに交互に接続された一対の外部電極を具備し、該外部電極に電界を印加して駆動する積層型圧電素子において、連続駆動前後の素子変位量の変化率が5%以内であることを特徴とする。

## 【0012】

また、本発明の積層型圧電素子は、少なくとも1つの圧電体と複数の内部電極とを交互に積層してなる積層体を有し、該積層体の側面に前記内部電極が一層おきに交互に接続された一対の外部電極を具備し、該外部電極に電界を印加して駆動する積層型圧電素子において、連続駆動中の素子変位量の最大変化率が5%以内であることを特徴とする。

## 【0013】

また、本発明の積層型圧電素子は、少なくとも1つの圧電体と複数の内部電極とを交互に積層してなる積層体を有し、該積層体の側面に前記内部電極が一層おきに交互に接続された一対の外部電極を具備し、該外部電極に電界を印加して駆動する積層型圧電素子において、連続駆動前後の圧電体の厚み寸法変化率が5%以内であることを特徴とする。

## 【0014】

また、本発明の積層型圧電素子は、少なくとも1つの圧電体と複数の内部電極とを交互に積層してなる積層体を有し、該積層体の側面に前記内部電極が一層おきに交互に接続された一対の外部電極を具備し、該外部電極に電界を印加して駆動する積層型圧電素子において、連続駆動前後の素子抵抗の変化率が5%以内であることを特徴とする。

## 【0015】

また、本発明の積層型圧電素子は、少なくとも1つの圧電体と複数の内部電極とを交互に積層してなる積層体を有し、該積層体の側面に前記内部電極が一層おきに交互に接続された一対の外部電極を具備し、該外部電極に電界を印加して駆動する積層型圧電素子において、連続駆動中の素子抵抗の最大変化率が5%以内であることを特徴とする。

## 【0016】

また、本発明の積層型圧電素子は、前記内部電極中の金属組成物がV I I I族金属および/またはI b族金属を主成分としたことを特徴とする。

## 【0017】

また、本発明の積層型圧電素子は、前記内部電極中のV I I I族金属の含有量をM1（重量%）、I b族金属の含有量をM2（重量%）としたとき、 $0 < M1 \leq 15$ 、 $85 \leq M$

2 < 100、 $M1 + M2 = 100$ を満足することを特徴とする。

【0018】

また、本発明の積層型圧電素子は、前記V I I I族金属がNi、Pt、Pd、Rh、Ir、Ru、Osのうち少なくとも1種以上であり、I b族金属がCu、Ag、Auのうち少なくとも1種以上であることを特徴とする。

【0019】

また、本発明の積層型圧電素子は、前記V I I I族金属がPt、Pdのうち少なくとも1種以上であり、I b族金属がAg、Auのうち少なくとも1種以上であることを特徴とする。

【0020】

また、本発明の積層型圧電素子は、前記V I I I族金属がNiであることを特徴とする。

【0021】

また、本発明の積層型圧電素子は、前記I b族金属がCuであることを特徴とする。

【0022】

また、本発明の積層型圧電素子は、前記内部電極中に金属組成物とともに酸化物、窒化物または炭化物を添加したことを特徴とする。

【0023】

また、本発明の積層型圧電素子は、前記酸化物が $PbZrO_3 - PbTiO_3$ からなるペロブスカイト型酸化物を主成分としたことを特徴とする。

【0024】

また、本発明の積層型圧電素子は、前記圧電体がペロブスカイト型酸化物を主成分とすることを特徴とする。

【0025】

また、本発明の積層型圧電素子は、前記圧電体が $PbZrO_3 - PbTiO_3$ からなるペロブスカイト型酸化物を主成分とすることを特徴とする。

【0026】

また、本発明の積層型圧電素子は、前記積層体の焼成温度が900℃以上1000℃以下であることを特徴とする。

【0027】

また、本発明の積層型圧電素子は、前記内部電極中の組成のずれが焼成前後で5%以下であることを特徴とする。

【0028】

また、本発明の積層型圧電素子は、前記積層体の側面に端部が露出する前記内部電極と端部が露出しない前記内部電極とが交互に構成されており、前記端部が露出していない前記内部電極と前記外部電極間の前記圧電体部分に溝が形成されており、該溝に前記圧電体よりもヤング率の低い絶縁体が充填されていることを特徴とする。

【0029】

また、本発明の噴射装置は、噴射孔を有する収納容器と、該収納容器に収納された請求項1乃至16のうちいずれかに記載の積層型圧電素子と、該積層型圧電素子の駆動により前記噴射孔から液体を噴出させるバルブとを具備してなることを特徴とする。

【発明の効果】

【0030】

このように、本発明の積層型圧電素子によれば、少なくとも1つの圧電体と複数の内部電極とを交互に積層してなる柱状積層体を有し、該柱状積層体の側面に前記内部電極が一層おきに交互に接続された一对の外部電極を具備し、該外部電極に電界を印加して駆動する積層型圧電素子において、連続駆動前後の素子変位量の変化率を5%以内とすることにより、積層型圧電素子を連続駆動させても、変位量が実効的に変化しないため、装置の誤作動がなくなり、さらに、熱暴走のない優れた耐久性を有することができる。

【0031】

また、本発明の積層型圧電素子は、連続駆動中の素子変位量の最大変化率を5%以内とすることにより、積層型圧電素子を連続駆動させても、変位量が実効的に変化しないために、装置の誤作動がなくなり、さらに、熱暴走のない優れた耐久性を有することができる。

【0032】

また、本発明の積層型圧電素子は、連続駆動前後の素子抵抗の変化率を5%以内とすることにより、装置の誤作動がなくなり、さらに、熱暴走のない優れた耐久性を有することができる。

【0033】

また、本発明の積層型圧電素子は、圧電体の駆動前後の厚み寸法変化率を5%以内とすることにより、装置の誤作動がなくなり、さらに、熱暴走のない優れた耐久性を有することができる。

【0034】

また、本発明の積層型圧電素子は、連続駆動中の素子抵抗の最大変化率を5%以内とすることにより、装置の誤作動がなくなり、さらに、熱暴走のない優れた耐久性を有することができる。

【0035】

さらに、前記内部電極中の金属組成物がV I I I族金属および／またはI b族金属を主成分とすることにより、前記内部電極を高い耐熱性を有する金属組成で形成できるため、焼成温度の高い前記圧電体との同時焼成が可能になる。

【0036】

さらに、前記内部電極中のV I I I族金属の含有量をM1（重量%）、I b族金属の含有量をM2（重量%）としたとき、 $0 < M1 \leq 15$ 、 $85 \leq M2 < 100$ 、 $M1 + M2 = 100$ を満足することにより、前記内部電極の比抵抗を小さくできるため、積層型圧電素子を長時間連続駆動させても、前記内部電極部の発熱を抑制することができる。併せて、積層型圧電素子の温度上昇を抑制できるため、素子変位量を安定化することができる。

【0037】

さらに、前記V I I I族金属がNi、Pt、Pd、Rh、Ir、Ru、Osのうち少なくとも1種以上であり、I b族金属がCu、Ag、Auのうち少なくとも1種以上であることにより、前記内部電極の原料として、合金原料および混合粉原料のいずれでも使用することができる。

【0038】

さらに、前記V I I I族金属がPt、Pdのうち少なくとも1種以上であり、I b族金属がAg、Auのうち少なくとも1種以上であることにより、耐熱性および耐酸化性に優れた前記内部電極を形成できる。

【0039】

さらに、前記V I I I族金属がNiであることにより、駆動時の変位によって生じる応力を緩和できるとともに、耐熱性に優れた前記内部電極を形成できる。

【0040】

さらに、前記I b族金属がCuであることにより、駆動時の変位によって生じる応力を緩和できるとともに、熱伝導性に優れた前記内部電極を形成できる。

【0041】

さらに、前記内部電極中に金属組成物とともに酸化物、窒化物または炭化物を添加することにより、前記内部電極と前記圧電体の界面の密着強度が増大するため、前記内部電極と前記圧電体の界面における剥離を抑制することができる。

【0042】

さらに、前記圧電体が $PbZrO_3 - PbTiO_3$ からなるペロブスカイト型酸化物を主成分としたことにより、前記圧電体と前記内部電極を同時焼成することができるため、焼成工程を短縮でき、併せて、前記内部電極の比抵抗を小さくできる。

【0043】



さらに、前記内部電極中の組成のずれが焼成前後で5%以下とすることにより、積層型圧電素子の駆動による伸縮に追従可能な前記内部電極を構成することができるため、前記内部電極の剥離を抑制することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0044】

図1は本発明の積層型圧電素子の一実施例を示すもので、(a)は斜視図、(b)は圧電体層と内部電極層との積層状態を示す斜視展開図である。

【0045】

本発明の積層型圧電素子は、図1に示すように、圧電体11と内部電極12とを交互に積層してなる積層体13の一对の対向側面において、内部電極12が露出した端部と、一層おきに電気的に導通する外部電極15が接合されている。また、積層体13の積層方向の両端の層には圧電体11で形成された不活性層を積層している。ここで、本発明の積層型圧電素子を積層型圧電アクチュエータとして使用する場合には、外部電極15にリード線を半田により接続固定し、前記リード線を外部電圧供給部に接続すればよい。

【0046】

圧電体11間には内部電極12が配されているが、この内部電極12は銀—パラジウム等の金属材料で形成しているので、内部電極12を通じて各圧電体11に所定の電圧を印加し、圧電体11を逆圧電効果による変位を起こさせる作用を有する。

【0047】

これに対して、不活性層14は内部電極12が配されていない複数の圧電体11の層であるため、電圧を印加しても変位を生じない。

【0048】

そして本発明の積層型圧電素子では、積層型圧電素子の連続駆動前後の素子変位量の変化率が5%以内としてある。これは、積層型圧電素子の連続駆動前後の素子変位量の変化率が5%を超えると、積層型圧電素子の劣化が増大し、積層型圧電素子の耐久性が著しく低下するためである。

【0049】

ここで、連続駆動前後の素子変位量の変化率とは、積層型圧電素子に任意の直流電圧を印加し、その際に起こる変位の量を連続駆動前の変位量（初期状態の変位量）とし、次に、積層型圧電素子に任意の交流電圧を印加して、 $1 \times 10^9$  回程度連続駆動させた後の変位の量を連続駆動後の変位量として、該連続駆動後の変位量が前記連続駆動前の変位量に対して変化した割合を示している。

【0050】

さらに、積層型圧電素子は連続駆動中の素子変位量の最大変化率が5%以内としてある。これは、積層型圧電素子の連続駆動中の素子変位量の最大変化率が5%を超えると、積層型圧電素子の駆動中に劣化の度合いが増大し、積層型圧電素子の耐久性が低下する場合がある。

【0051】

ここで、連続駆動中の素子変位量の最大変化率とは、積層型圧電素子に任意の直流電圧を印加し、その際に起こる変位の量を連続駆動前の変位量（初期状態の変位量）とし、次に、積層型圧電素子に任意の交流電圧を印加して、 $1 \times 10^8$  回程度連続駆動させている際に起こる変位の最大値を連続駆動中の最大変位量として、該連続駆動中の最大変位量が前記連続駆動前の変位量に対して変化した割合を示している。

【0052】

また、本発明の積層型圧電素子では、連続駆動前後の圧電体の厚み寸法変化率が5%以内としてある。これは、積層型圧電素子の連続駆動前後の圧電体の厚み寸法変化率が5%を超えると、駆動前後の積層型圧電素子の寸法自体が変化するため、結果的に変位量が変動するために、積層型圧電素子の劣化が増大し、積層型圧電素子の耐久性が著しく低下するためである。

【0053】

尚、圧電体の厚み寸法は、積層型圧電素子の断面や側面における圧電体をSEMで観察することにより測定することができる。

#### 【0054】

ここで、圧電体の駆動前後の厚み寸法変化率とは、積層型圧電素子に任意の交流電圧を印加し、 $1 \times 10^9$  回程度連続駆動させた後の積層型圧電素子の積層方向における圧電体の厚み寸法が、連続駆動前の圧電体の厚み寸法に対して変化した割合を示している。

#### 【0055】

また、圧電体の厚み寸法変化率は、駆動前の積層型圧電素子の側面をSEM等の顕微鏡で観察して、任意の10箇所の圧電体の厚み寸法を測定して平均値を算出し、駆動後、同一箇所の厚み寸法を測定して平均値を算出すれば、駆動前後の圧電体の厚み寸法の変化率を規定できる。

#### 【0056】

また、本発明の積層型圧電素子では、積層型圧電素子の連続駆動前後の素子抵抗の変化率が5%以内としてある。これは、積層型圧電素子の連続駆動前後の素子抵抗の変化率が5%を超えると、積層型圧電素子の劣化が増大し、積層型圧電素子の耐久性が著しく低下するためである。

#### 【0057】

ここで、連続駆動前後の素子抵抗の変化率とは、積層型圧電素子に任意の直流電圧を印加し、その際に測定された素子の抵抗値を連続駆動前の素子抵抗とし、次に、積層型圧電素子に任意の交流電圧を印加して、 $1 \times 10^9$  回程度連続駆動させた後の素子の抵抗値を連続駆動後の素子抵抗として、該連続駆動後の素子抵抗が前記連続駆動前の素子抵抗に対して変化した割合を示している。

#### 【0058】

さらに、積層型圧電素子は連続駆動中の素子抵抗の最大変化率が5%以内としてある。これは、積層型圧電素子の連続駆動中の素子抵抗の最大変化率が5%を超えると、積層型圧電素子の駆動中に劣化が増大し、積層型圧電素子の耐久性が低下する場合がある。

#### 【0059】

ここで、連続駆動中の素子抵抗の最大変化率とは、積層型圧電素子に任意の直流電圧を印加し、その際に測定された素子の抵抗値を連続駆動前の素子抵抗とし、次に、積層型圧電素子に任意の交流電圧を印加して、 $1 \times 10^8$  回程度連続駆動させている際に変化した素子抵抗の最大抵抗値を連続駆動中の素子抵抗として、該連続駆動中の素子抵抗が前記連続駆動前の素子抵抗に対して変化した割合を示している。

#### 【0060】

上記に示したような本発明の積層型圧電素子において、連続駆動前後や連続駆動中の素子変化量、そして、連続駆動前後の圧電体の厚み寸法変化率、そして、連続駆動前後や連続駆動中素子抵抗の変化率を5%以内にするために以下のようにすればよい。

#### 【0061】

これまで、素子変位量、圧電体の厚み寸法変化率、または素子抵抗の変化を抑制する手段としては、連続駆動中の素子温度を一定に保つ方法や、素子温度に応じて駆動電圧を細かく制御する方法が用いられてきた。具体的には、素子温度をモニターしながら駆動電圧を制御したり、素子周辺温度を制御するために、放熱を積極的に行うヒートシンクを取り付けたりした。

#### 【0062】

これに対して、本発明においては、駆動により発生する素子自身の発熱を抑制することにより、連続駆動中の素子温度を制御した。前記素子温度を制御するためには、圧電体11の誘電損失 ( $\tan \delta$ ) を小さくしたり、素子抵抗を小さくする必要がある。

#### 【0063】

また、分極の度合いにより圧電体の厚み寸法が変化することから、連続駆動前後の圧電体の厚み寸法変化率を一定に保つには、連続駆動前後の分極状態が同一となるように、圧電体の誘電損失 ( $\tan \delta$ ) を小さくする必要がある。さらに、圧電体の温度がキュリー

点よりも高い温度になってしまうと、駆動前の分極状態と駆動中の分極状態が変化してしまい、連続駆動前後の圧電体の厚み寸法や変位量が増加しやすくなるため、素子温度の上昇を抑制する必要がある。そこで、電極材料の比抵抗を小さくすることで駆動時に素子自身の温度上昇を抑止することが必要である。

#### 【0064】

誘電損失 ( $\tan \delta$ ) を小さくするためには、圧電体11を  $\text{PbZrO}_3 - \text{PbTiO}_3$  等のペロブスカイト型酸化物を主成分として形成する場合、積層体13を酸素過剰雰囲気中で焼成する方法や、また、積層体13の焼成後の処理において、最大焼成温度からの降温速度を遅くする方法がある。具体的には、降温速度を  $600^\circ\text{C}/\text{時}$  以下にすればよく、好ましくは  $300^\circ\text{C}/\text{時}$  以下にすればよい。また、誘電損失 ( $\tan \delta$ ) の値としては、1.5%未満であればよく、好ましくは0.5%以下にすればよい。

#### 【0065】

また、素子抵抗を小さくするには、内部電極12に比抵抗値が小さい組成の材料を用いるとともに、電気伝導の経路を確保した緻密な構造にするとよい。

#### 【0066】

さらに、圧電体11の構成材料が有する変位量の温度特性が、使用温度に関係なく一定であることが望ましいので、連続駆動中の素子温度変化に対して変位量が小さい圧電体材料が好ましい。

#### 【0067】

また、効率良く素子内部の熱を素子の外側に放出するために、熱が伝わる内部電極12を熱伝導特性の優れた組成にすることが好ましい。

#### 【0068】

さらに、内部電極12中の金属組成物がVIII族金属および/またはIb族金属を主成分とすることが望ましい。これは、上記の金属組成物は高い耐熱性を有するため、焼成温度の高い圧電体11と内部電極12を同時焼成することも可能である。

#### 【0069】

さらに、内部電極12中の金属組成物がVIII族金属の含有量をM1(重量%)、Ib族金属の含有量をM2(重量%)としたとき、 $0 < M1 \leq 15$ 、 $85 \leq M2 < 100$ 、 $M1 + M2 = 100$  を満足する金属組成物を主成分とすることが好ましい。これは、VIII族金属が15重量%を超えると、内部電極12の比抵抗が大きくなり、積層型圧電素子を連続駆動させた場合、内部電極12が発熱する場合があるからである。また、内部電極2中のIb族金属の圧電体11へのマイグレーションを抑制するために、VIII族金属が0.001重量%以上15重量%以下とすることが好ましい。また、積層型圧電素子の耐久性を向上させるという点では、0.1重量%以上10重量%以下が好ましい。また、熱伝導に優れ、より高い耐久性を必要とする場合は0.5重量%以上9.5重量%以下がより好ましい。また、さらに高い耐久性を求める場合は2重量%以上8重量%以下がさらに好ましい。

#### 【0070】

ここで、Ib族金属が85重量%未満になると、内部電極12の比抵抗が大きくなり、積層型圧電素子を連続駆動させた場合、内部電極12が発熱する場合があるからである。また、内部金属12中のIb族金属の圧電体11へのマイグレーションを抑制するために、Ib族金属が85重量%以上99.999重量%以下とすることが好ましい。また、積層型圧電素子の耐久性を向上させるという点では、90重量%以上99.9重量%以下が好ましい。また、より高い耐久性を必要とする場合は90.5重量%以上99.5重量%以下がより好ましい。また、さらに高い耐久性を求める場合は92重量%以上98重量%以下がさらに好ましい。

#### 【0071】

上記の内部電極12中の金属成分の重量%を示すVIII族金属、Ib族金属はEPM A (Electron Probe Micro Analysis) 法等の分析方法で特定できる。

## 【0072】

さらに、本発明の内部電極12中の金属成分は、VIII族金属がNi、Pt、Pd、Rh、Ir、Ru、Osのうち少なくとも1種以上であり、Ib族金属がCu、Ag、Auのうち少なくとも1種以上であることが好ましい。これは、近年における合金粉末合成技術において量産性に優れた金属組成であるからである。

## 【0073】

さらに、内部電極12中の金属成分は、VIII族金属がPt、Pdのうち少なくとも1種以上であり、Ib族金属がAg、Auのうち少なくとも1種以上であることが好ましい。これにより、耐熱性に優れ、比抵抗の小さな内部電極12を形成できる可能性がある。

## 【0074】

さらに、内部電極12中の金属成分は、VIII族金属がNiであり、Ib族金属がCuであることが好ましい。これにより、耐熱性および熱伝導性に優れた内部電極12を形成できる可能性がある。

## 【0075】

さらに、内部電極12中には、金属組成物とともに酸化物、窒化物または炭化物を添加することが好ましい。これにより、内部電極12と圧電体11を強固に結合でき、積層型圧電素子の耐久性が向上する。

## 【0076】

前記酸化物が $\text{PbZrO}_3 - \text{PbTiO}_3$ からなるペロブスカイト型酸化物を主成分とすることが好ましい。尚、添加された酸化物等の含有量は、積層型圧電素子の断面SEM像における内部電極中の組成の面積比から算出できる。

## 【0077】

さらに、圧電体11がペロブスカイト型酸化物を主成分とすることが好ましい。これは、例えば、チタン酸バリウム( $\text{BaTiO}_3$ )を代表とするペロブスカイト型圧電セラミックス材料等で形成されると、その圧電特性を示す圧電歪み定数 $d_{33}$ が高いことから、変位量を大きくすることができ、さらに、圧電体11と内部電極12を同時に焼成することもできる。上記に示した圧電体11としては、圧電歪み定数 $d_{33}$ が比較的高い $\text{PbZrO}_3 - \text{PbTiO}_3$ からなるペロブスカイト型酸化物を主成分とすることが好ましい。

## 【0078】

さらに、焼成温度が900℃以上1000℃以下であることが好ましい。これは、焼成温度が900℃以下では、焼成温度が低いため焼成が不十分となり、緻密な圧電体11を作製することが困難になる。また、焼成温度が1000℃を超えると、焼成時の内部電極12の収縮と圧電体11の収縮のずれから起因した応力が大きくなり、積層型圧電素子の連続駆動時にクラックが発生する可能性があるからである。

## 【0079】

また、内部電極12中の組成のずれが焼成前後で5%以下であることが好ましい。これは、内部電極12中の組成のずれが焼成前後で5%を超えると、内部電極12中の金属材料が圧電体11へのマイグレーションが多くなり、積層型圧電素子の駆動による伸縮に対して、内部電極12が追従できなくなる可能性がある。

## 【0080】

ここで、内部電極12中の組成のずれとは、内部電極12を構成する元素が焼成によって蒸発、または圧電体11へ拡散することにより内部電極12の組成が変わる変化率を示している。

## 【0081】

また、本発明の積層型圧電素子の側面に端部が露出する内部電極12と端部が露出しない内部電極12とが交互に構成されており、前記端部が露出していない内部電極12と外部電極15間の圧電体部分に溝が形成されており、この溝内に、圧電体12よりもヤング率の低い絶縁体が形成されていることが好ましい。これにより、このような積層型圧電素子では、駆動中の変位によって生じる応力を緩和することができることから、連続駆動さ

せても、内部電極 12 の発熱を抑制することができる。

【0082】

次に、本発明の積層型圧電素子の製法を説明する。

【0083】

本発明の積層型圧電素子は、まず、 $PbZrO_3-PbTiO_3$  等からなるペロブスカイト型酸化物の圧電セラミックスの仮焼粉末と、アクリル系、ブチラル系等の有機高分子から成るバインダーと、DBP（フタル酸ジオチル）、DOP（フタル酸ジブチル）等の可塑剤とを混合してスラリーを作製し、該スラリーを周知のドクターブレード法やカレンダーロール法等のテープ成型法により圧電体 11 となるセラミックグリーンシートを作製する。

【0084】

次に、銀-パラジウム等の内部電極を構成する金属粉末にバインダー、可塑剤等を添加混合して導電性ペーストを作製し、これを前記各グリーンシートの上面にスクリーン印刷等によって  $1 \sim 40 \mu m$  の厚みに印刷する。

【0085】

そして、上面に導電性ペーストが印刷されたグリーンシートを複数積層し、この積層体について所定の温度で脱バインダーを行った後、 $900 \sim 1200^\circ C$  で焼成することによって積層体 13 が作製される。

【0086】

尚、積層体 13 は、上記製法によって作製されるものに限定されるものではなく、複数の圧電体 11 と複数の内部電極 12 とを交互に積層してなる積層体 13 を作製できれば、どのような製法によって形成されても良い。

【0087】

その後、積層型圧電素子の側面に端部が露出する内部電極 12 と端部が露出しない内部電極 12 とを交互に形成して、端部が露出していない内部電極 12 と外部電極 15 間の圧電体部分に溝を形成して、この溝内に、圧電体 11 よりもヤング率の低い、樹脂またはゴム等の絶縁体を形成する。ここで、前記溝は内部ダイシング装置等で積層体 13 の側面に形成される。

【0088】

外部電極 15 は構成する導電材はアクチュエータの伸縮によって生じる応力を十分に吸収するという点から、ヤング率の低い銀、若しくは銀が主成分の合金が望ましい。

【0089】

ガラス粉末に、バインダーを加えて銀ガラス導電性ペーストを作製し、これをシート状に成形し、乾燥した（溶媒を飛散させた）シートの生密度を  $6 \sim 9 g/cm^3$  に制御し、このシートを、柱状積層体 13 の外部電極形成面に転写し、ガラスの軟化点よりも高い温度、且つ銀の融点（ $965^\circ C$ ）以下の温度で、且つ焼成温度（ $^\circ C$ ）の  $4/5$  以下の温度で焼き付けを行うことにより、銀ガラス導電性ペーストを用いて作製したシート中のバインダー成分が飛散消失し、3次元網目構造をなす多孔質導電体からなる外部電極 15 を形成することができる。

【0090】

なお、前記銀ガラス導電性ペーストの焼き付け温度は、ネック部を有効的に形成し、銀ガラス導電性ペースト中の銀と内部電極 12 を拡散接合させ、また、外部電極 15 中の空隙を有効に残存させ、さらには、外部電極 15 と柱状積層体 13 側面とを部分的に接合させるという点から、 $550 \sim 700^\circ C$  が望ましい。また、銀ガラス導電性ペースト中のガラス成分の軟化点は、 $500 \sim 700^\circ C$  が望ましい。

【0091】

焼き付け温度が  $700^\circ C$  より高い場合には、銀ガラス導電性ペーストの銀粉末の焼結が進みすぎ、有効的な 3次元網目構造をなす多孔質導電体を形成することができず、外部電極 15 が緻密になりすぎてしまい、結果として外部電極 15 のヤング率が高くなりすぎ駆動時の応力を十分に吸収することができずに外部電極 15 が断線してしまう可能性がある

。好ましくは、ガラスの軟化点の 1. 2 倍以内の温度で焼き付けを行った方がよい。

【0092】

一方、焼き付け温度が 550℃よりも低い場合には、内部電極 12 端部と外部電極 15 の間で十分に拡散接合がなされないために、ネック部が形成されず、駆動時に内部電極 12 と外部電極 15 の間でスパークを起こしてしまう可能性がある。

【0093】

なお、銀ガラス導電性ペーストのシートの厚みは、圧電体 11 の厚みよりも薄いことが望ましい。さらに好ましくは、アクチュエータの伸縮に追従するという点から、50  $\mu$ m 以下がよい。

【0094】

次に、外部電極 15 を形成した積層体 13 をシリコンゴム溶液に浸漬するとともに、シリコンゴム溶液を真空脱気することにより、積層体 13 の溝内部にシリコンゴムを充填し、その後シリコンゴム溶液から積層体 13 を引き上げ、積層体 13 の側面にシリコンゴムをコーティングする。その後、溝内部に充填、及び柱状積層体 13 の側面にコーティングした前記シリコンゴムを硬化させることにより、本発明の積層型圧電素子が完成する。

【0095】

そして、外部電極 15 にリード線を接続し、該リード線を介して一对の外部電極 15 に 0. 1~3 kV/mm の直流電圧を印加し、積層体 13 を分極処理することによって、本発明の積層型圧電素子を利用した積層型圧電アクチュエータが完成し、リード線を外部の電圧供給部に接続し、リード線及び外部電極 15 を介して内部電極 12 に電圧を印加させれば、各圧電体 11 は逆圧電効果によって大きく変位し、これによって例えばエンジンに燃料を噴射供給する自動車用燃料噴射弁として機能する。

【0096】

さらに、外部電極 15 の外面に、金属のメッシュ若しくはメッシュ状の金属板が埋設された導電性接着剤からなる導電性補助部材を形成してもよい。この場合には、外部電極 15 の外面に導電性補助部材を設けることによりアクチュエータに大電流を投入し、高速で駆動させる場合においても、大電流を導電性補助部材に流すことができ、外部電極 15 に流れる電流を低減できるという理由から、外部電極 15 が局所発熱を起こし断線することを防ぐことができ、耐久性を大幅に向上させることができる。さらには、導電性接着剤中に金属のメッシュ若しくはメッシュ状の金属板を埋設しているため、前記導電性接着剤にクラックが生じるのを防ぐことができる。

【0097】

金属のメッシュとは金属線を編み込んだものであり、メッシュ状の金属板とは、金属板に孔を形成してメッシュ状にしたものをいう。

【0098】

さらに、前記導電性補助部材を構成する導電性接着剤は銀粉末を分散させたポリイミド樹脂からなることが望ましい。即ち、比抵抗の低い銀粉末を、耐熱性の高いポリイミド樹脂に分散させることにより、高温での使用に際しても、抵抗値が低く且つ高い接着強度を維持した導電性補助部材を形成することができる。さらに望ましくは、前記導電性粒子はフレーク状や針状などの非球形の粒子であることが望ましい。これは、導電性粒子の形状をフレーク状や針状などの非球形の粒子とすることにより、該導電性粒子間の絡み合いを強固にすることができ、該導電性接着剤のせん断強度をより高めることができるためである。

【0099】

本発明の積層型圧電素子はこれらに限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲であれば種々の変更は可能である。

【0100】

また、上記では、積層体 13 の対向する側面に外部電極 15 を形成した例について説明したが、本発明では、例えば隣設する側面に一对の外部電極を形成してもよい。

## 【0101】

図2は、本発明の噴射装置を示すもので、収納容器31の一端には噴射孔33が設けられ、また収納容器31内には、噴射孔33を開閉することができるニードルバルブ35が収容されている。

## 【0102】

噴射孔33には燃料通路37が連通可能に設けられ、この燃料通路37は外部の燃料供給源に連結され、燃料通路37に常時一定の高圧で燃料が供給されている。従って、ニードルバルブ35が噴射孔33を開放すると、燃料通路37に供給されていた燃料が一定の高圧で内燃機関の図示しない燃料室内に噴出されるように形成されている。

## 【0103】

また、ニードルバルブ35の上端部は直径が大きくなっており、収納容器31に形成されたシリンダ39と摺動可能なピストン41となっている。そして、収納容器31内には、上記した圧電アクチュエータ43が収納されている。

## 【0104】

このような噴射装置では、圧電アクチュエータ43が電圧を印加されて伸長すると、ピストン41が押圧され、ニードルバルブ35が噴射孔33を閉塞し、燃料の供給が停止される。また、電圧の印加が停止されると圧電アクチュエータ43が収縮し、皿バネ45がピストン41を押し返し、噴射孔33が燃料通路37と連通して燃料の噴射が行われるようになっている。

## 【0105】

また、本発明は、積層型圧電素子および噴射装置に関するものであるが、上記実施例に限定されるものではなく、例えば、自動車エンジンの燃料噴射装置、インクジェット等の液体噴射装置、光学装置等の精密位置決め装置や振動防止装置等に搭載される駆動素子、または、燃焼圧センサ、ノックセンサ、加速度センサ、荷重センサ、超音波センサ、感圧センサ、ヨーレートセンサ等に搭載されるセンサ素子、ならびに圧電ジャイロ、圧電スイッチ、圧電トランス、圧電ブレーカー等に搭載される回路素子以外であっても、圧電特性を用いた素子であれば、実施可能であることは言うまでもない。

## 【実施例】

## 【0106】

本発明の積層型圧電素子からなる積層型圧電アクチュエータを以下のようにして作製した。

## 【0107】

まず、チタン酸ジルコン酸鉛 ( $\text{PbZrO}_3 - \text{PbTiO}_3$ ) を主成分とする圧電セラミックの仮焼粉末、バインダー、及び可塑剤を混合したスラリーを作製し、ドクターブレード法で厚み  $150\mu\text{m}$  の圧電体11になるセラミックグリーンシートを作製した。

## 【0108】

このセラミックグリーンシートの片面に、任意の組成比で形成された銀-パラジウム合金にバインダーを加えた導電性ペーストが、スクリーン印刷法により  $3\mu\text{m}$  の厚みに形成されたシートを300枚積層し、 $1000^\circ\text{C}$  で焼成した。

## 【0109】

次に、ダイシング装置により積層体の側面の内部電極の端部に一層おきに深さ  $50\mu\text{m}$ 、幅  $50\mu\text{m}$  の溝を形成した。

## 【0110】

次に、平均粒径  $2\mu\text{m}$  のフレーク状の銀粉末を90体積%と、残部が平均粒径  $2\mu\text{m}$  のケイ素を主成分とする軟化点が  $640^\circ\text{C}$  の非晶質のガラス粉末10体積%との混合物に、バインダーを銀粉末とガラス粉末の合計重量100質量部に対して8質量部添加し、十分に混合して銀ガラス導電性ペーストを作製した。このようにして作製した銀ガラス導電性ペーストを離型フィルム上にスクリーン印刷によって形成し、乾燥後、離型フィルムより剥がして、銀ガラス導電性ペーストのシートを得た。このシートの生密度をアルキメデス法にて測定したところ、 $6.5\text{g}/\text{cm}^3$  であった。

## 【0111】

次に、前記銀ガラスペーストのシートを積層体13の外部電極15面に転写し、650℃で30分焼き付けを行い、3次元網目構造をなす多孔質導電体からなる外部電極15を形成した。なお、この時の外部電極15の空隙率は、外部電極15の断面写真を画像解析装置を用いて測定したところ40%であった。

## 【0112】

その後、外部電極15にリード線を接続し、正極及び負極の外部電極15にリード線を介して3kV/mmの直流電界を15分間印加して分極処理を行い、図1に示すような積層型圧電素子を用いた積層型圧電アクチュエータを作製した。

## 【0113】

(実施例1) 上記の製法に加えて、素子抵抗の抵抗値や圧電体11の誘電損失( $\tan \delta$ )を抑制して作製された本発明の積層型圧電アクチュエータにおいて、積層型圧電アクチュエータの連続駆動前後における素子変位量の変化率、圧電体の厚み寸法変化率、素子抵抗の変化率、および素子温度の変化率を測定し、それらと積層型圧電アクチュエータの長期駆動による劣化の度合との関連について検証した。

## 【0114】

ここで、劣化の度合とは、積層型圧電アクチュエータを任意の回数で駆動させた後の素子変位量(連続駆動後の素子変位量)を測定し、さらに、上記の積層型圧電アクチュエータを所定の回数で駆動させた後の素子変位量(長期駆動後の素子変位量)を測定して、該長期駆動後の素子変位量が前記連続駆動後の素子変位量に対して変化した割合で示している。これにより、任意の回数で駆動した積層型圧電アクチュエータを、さらに所定回数で駆動させて、これによって引き起こされる劣化の様子を確認することができる。

## 【0115】

また、比較例として、上記の積層型圧電アクチュエータの連続駆動前後における素子変位量の変化率、または素子抵抗の変化率が5%を超える範囲で形成した試料を作製した。

## 【0116】

上記のようにして得られた積層型圧電アクチュエータに対して、170Vの直流電圧を印加したところ、すべての積層型圧電アクチュエータにおいて、積層方向に45 $\mu$ mの変位量が得られた。さらに、この積層型圧電アクチュエータを室温で0~+170Vの交流電圧を150Hzの周波数で印加して、 $1 \times 10^9$ 回まで連続駆動し、さらに、 $1 \times 10^{10}$ 回まで長期駆動した試験を行った。結果は表1に示すとおりである。圧電体の厚み寸法変化率を測定するには、駆動前の積層型圧電素子の側面をSEMを用いて任意の10箇所の圧電体の厚み寸法を測定して平均値を算出し、駆動後、同一箇所の厚み寸法を測定して平均値を算出し、駆動前後の圧電体の厚み寸法の変化率を算出した。

【表1】

| No | 銀100%の抵抗を1として規格化した内部電極抵抗 | 圧電体の誘電体損失 $\tan \delta$ (%) | 初期状態の変位量( $\mu$ m)=A | 連続駆動後(1 $\times 10^9$ 回)素子温度の変化率(%) | 連続駆動後(1 $\times 10^9$ 回)圧電体厚み寸法の変化率(%) | 連続駆動後(1 $\times 10^9$ 回)素子抵抗の変化率(%) | 連続駆動後(1 $\times 10^9$ 回)最大変位量( $\mu$ m)=B | 初期状態に対する連続駆動後の変位量変化率(%)<br>=  (A-B)/A $\times 100$ | 長期駆動後(1 $\times 10^{10}$ 回)の変位量( $\mu$ m)=C | 劣化の度合(%)<br>=  (B-C)/B $\times 100$ |
|----|--------------------------|-----------------------------|----------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|---|--|---|-------------------------------------|
| 1  | 2                        | 0.5                         | 45.0                 | 0.0                                 | 0.0                                    | 0.0                                 | 45.0                                      | 0.0  | 45.0  | 0.00                                |
| 2  | 3                        | 0.5                         | 45.0                 | 0.2                                 | 0.2                                    | 0.2                                 | 44.9                                      | 0.2  | 44.9  | 0.00                                |
| 3  | 3.5                      | 0.5                         | 45.0                 | 0.4                                 | 0.4                                    | 0.4                                 | 44.8                                      | 0.4  | 44.7  | 0.22                                |
| 4  | 4                        | 0.5                         | 45.0                 | 0.6                                 | 0.6                                    | 0.7                                 | 44.7                                      | 0.7  | 44.6  | 0.22                                |
| 5  | 5                        | 0.5                         | 45.0                 | 0.8                                 | 0.8                                    | 0.9                                 | 44.6                                      | 0.9  | 44.4  | 0.45                                |
| 6  | 8                        | 0.5                         | 45.0                 | 1.2                                 | 1.2                                    | 1.3                                 | 44.4                                      | 1.3  | 44.1  | 0.68                                |
| 7  | 10                       | 0.5                         | 45.0                 | 2.6                                 | 2.6                                    | 2.9                                 | 43.7                                      | 2.9  | 43.2  | 1.14                                |
| 8  | 5                        | 1.0                         | 45.0                 | 4.5                                 | 5.0                                    | 5.0                                 | 42.8                                      | 5.0  | 41.9  | 2.10                                |
| 9  | 5                        | 1.5                         | 45.0                 | 6.2                                 | 6.4                                    | 6.9                                 | 41.9                                      | 6.9  | 38.5  | 8.11                                |

\*を付した試料番号は本発明の請求範囲外のものである

## 【0117】

この表1から、比較例である試料番号9は、連続駆動前後における素子変位量の変化率が5%よりも大きいため、積層型圧電アクチュエータを $1 \times 10^9$ 回まで連続駆動させた後に $1 \times 10^{10}$ 回まで長期駆動させると、 $1 \times 10^9$ 回まで連続駆動させた後の素子変位量に比べて、 $1 \times 10^{10}$ 回まで長期駆動させた後の素子変位量が著しく低下したので



、劣化の度合が増大し、積層型圧電アクチュエータの連続駆動が困難になった。

【0118】

また、連続駆動前後における素子抵抗の変化率が5%よりも大きいため、積層型圧電アクチュエータを $1 \times 10^9$ 回連続駆動させた後に $1 \times 10^{10}$ 回まで長期駆動させると、 $1 \times 10^9$ 回連続駆動させた後の素子変位量に比べて、 $1 \times 10^{10}$ 回まで長期駆動させた後の素子変位量が著しく減少したので、劣化の度合が増大し、積層型圧電アクチュエータの連続駆動が困難になった。

【0119】

さらに、連続駆動前後における圧電体寸法の変化率が5%よりも大きいため、積層型圧電アクチュエータを $1 \times 10^9$ 回連続駆動させた後に $1 \times 10^{10}$ 回まで長期駆動させると、 $1 \times 10^9$ 回連続駆動させた後の素子変位量に比べて、 $1 \times 10^{10}$ 回まで長期駆動させた後の素子変位量が著しく減少したので、劣化の度合が増大し、積層型圧電アクチュエータの連続駆動が困難になった。

【0120】

これに対して、本発明の実施例である試料番号1～8では、連続駆動前後における素子変位量の変化率が5%以内の範囲で形成した積層型圧電アクチュエータであったため、 $1 \times 10^9$ 回連続駆動させた後に $1 \times 10^{10}$ 回まで長期駆動させても、素子変位量が著しく低下することなく、積層型圧電アクチュエータとして必要とする実効的な変位量を有し、また、熱暴走や誤作動が生じない優れた耐久性を有した積層型圧電アクチュエータを作製できた。

【0121】

同様に、試料番号1～8では、連続駆動前後における素子抵抗の変化率が5%以内であったため、 $1 \times 10^9$ 回連続駆動させた後に $1 \times 10^{10}$ 回まで長期駆動させても、素子変位量が著しく低下することなく、積層型圧電アクチュエータとして必要とする実効的な変位量を有し、また、熱暴走や誤作動が生じない優れた耐久性を有した積層型圧電アクチュエータを作製できた。

【0122】

同様に、試料番号1～8では、連続駆動前後における圧電体寸法の変化率が5%以内であったため、 $1 \times 10^9$ 回連続駆動させた後に $1 \times 10^{10}$ 回まで長期駆動させても、素子変位量が著しく低下することなく、積層型圧電アクチュエータとして必要とする実効的な変位量を有し、また、熱暴走や誤作動が生じない優れた耐久性を有した積層型圧電アクチュエータを作製できた。

【0123】

(実施例2) 上記の製法に加えて、素子抵抗の抵抗値や圧電体11の誘電損失( $\tan \delta$ )を抑制して作製された本発明の積層型圧電アクチュエータにおいて、積層型圧電アクチュエータの連続駆動中における素子変位量の最大変化率、素子抵抗の最大変化率、および素子温度の変化率を測定し、それらと積層型圧電アクチュエータの耐久性との関連について検証した。

【0124】

ここで、劣化の度合とは、積層型圧電アクチュエータを任意の回数で駆動中の最大素子変位量(連続駆動中の最大素子変位量)を測定し、さらに、上記の積層型圧電アクチュエータを所定の回数で駆動させた後の素子変位量(連続駆動後の素子変位量)を測定して、該連続駆動後の素子変位量が前記連続駆動中の最大素子変位量に対して変化した割合で示している。これにより、任意の回数で駆動中の積層型圧電アクチュエータを所定回数で連続駆動させたことによって引き起こされる劣化の様子を確認することができる。

【0125】

また、比較例として、上記の積層型圧電アクチュエータの連続駆動中における素子変位量の変化率、または素子抵抗の変化率が5%を超える範囲で形成した試料を作製した。

【0126】

上記のようにして得られた積層型圧電アクチュエータに対して、170Vの直流電圧を

印加したところ、すべての積層型圧電アクチュエータにおいて、積層方向に  $45\ \mu\text{m}$  の変位量が得られた。さらに、この積層型圧電アクチュエータを室温で  $0 \sim +170\ \text{V}$  の交流電圧を  $150\ \text{Hz}$  の周波数で印加して、 $1 \times 10^9$  回まで連続駆動させた駆動試験を行った。結果は表 2 に示すとおりである。

【表 2】

| No | 総100%の抵抗を1として規格化した内部電極抵抗 | 圧電体の誘電体損失 $\tan \delta$ (%) | 初期状態の変位量 ( $\mu\text{m}$ )<br>=A | 連続駆動中 ( $1 \times 10^8$ 回) 素子温度の最大変化率 (%) | 連続駆動中 ( $1 \times 10^8$ 回) 素子抵抗の最大変化率 (%) | 連続駆動中 ( $1 \times 10^8$ 回) 最大変位量 ( $\mu\text{m}$ )<br>=B | 初期状態に対する連続駆動中の変位量の最大変化率 (%)<br>=  (A-B)/A × 100 | 連続駆動後 ( $1 \times 10^9$ 回) の変位量 ( $\mu\text{m}$ )<br>=C | 劣化の度合 (%)<br>=  (B-C)/B × 100 |
|----|--------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---|---|--|---|---|-------------------------------|
| 1  | 2                        | 0.5                         | 45.0                             | 0.0                                       | 0.0                                       | 45.0   | 0   | 45.0  | 0.00                          |
| 2  | 3                        | 0.5                         | 45.0                             | 0.2                                       | 0.2                                       | 44.9   | 0.2   | 44.9  | 0.00                          |
| 3  | 4                        | 0.5                         | 45.0                             | 0.4                                       | 0.4                                       | 44.8   | 0.4   | 44.7  | 0.22                          |
| 4  | 5                        | 0.5                         | 45.0                             | 0.6                                       | 0.7                                       | 44.7   | 0.7   | 44.6  | 0.22                          |
| 5  | 8                        | 0.5                         | 45.0                             | 0.8                                       | 0.9                                       | 44.6   | 0.9   | 44.4  | 0.45                          |
| 6  | 10                       | 0.5                         | 45.0                             | 1.8                                       | 2.0                                       | 44.1   | 2.0   | 43.7  | 0.91                          |
| 7  | 5                        | 1.5                         | 45.0                             | 4.5                                       | 5.0                                       | 42.8   | 5.0   | 41.9  | 1.99                          |
| *8 | 8                        | 1.5                         | 45.0                             | 7.0                                       | 7.8                                       | 41.5   | 7.8   | 38.0  | 8.43                          |
| *9 | 10                       | 2.5                         | 45.0                             | 5.0                                       | 5.6                                       | 47.5   | 5.6   | 熱暴走発生   | —                             |

\*を付した試料番号は本発明の請求範囲外のものである

## 【0127】

この表 2 から、比較例である試料番号 8 および 9 は、連続駆動中における素子変位量の最大変化率が 5 % よりも大きいため、積層型圧電アクチュエータを  $1 \times 10^9$  回まで連続駆動させて、 $1 \times 10^8$  回まで連続駆動中の最大素子変位量に比べて、 $1 \times 10^9$  回まで連続駆動させた後の素子変位量が著しく低下したので劣化の度合が増大し、また、試料番号 9 は熱暴走によって素子が破壊したため、積層型圧電アクチュエータの連続駆動が困難になった。

## 【0128】

また、連続駆動中における素子抵抗の最大変化率が 5 % よりも大きいため、積層型圧電アクチュエータを  $1 \times 10^9$  回まで連続駆動させて、 $1 \times 10^8$  回まで連続駆動中の最大素子変位量に比べて、 $1 \times 10^9$  回まで連続駆動させた後の素子変位量が著しく低下したので、劣化の度合が増大し、積層型圧電アクチュエータの連続駆動が困難になった。

## 【0129】

これらに対して、本発明の実施例である試料番号 1～7 では、連続駆動中における素子変位量の最大変化率が 5 % 以内の範囲で形成した積層型圧電アクチュエータであったため、 $1 \times 10^9$  回連続駆動させた後でも、素子変位量が著しく低下することなく、積層型圧電アクチュエータとして必要とする実効的な変位量を有し、また、熱暴走や誤作動が生じない優れた耐久性を有した積層型圧電アクチュエータを作製できた。

## 【0130】

同様に、試料番号 1～7 では、連続駆動前後における素子抵抗の変化率が 5 % 以内であったため、 $1 \times 10^9$  回まで連続駆動させた後でも、積層型圧電アクチュエータとして必要とする実効的な変位量を有し、また、熱暴走や誤作動が生じない優れた耐久性を有した積層型圧電アクチュエータを作製できた。

## 【0131】

(実施例 3) 上記の製法において、様々な電極材料組成で形成した内部電極 12 を有する積層型圧電アクチュエータにおいて、積層型圧電アクチュエータの連続駆動中における素子変位量の最大変化率を測定し、内部電極 12 の電極材料組成と積層型圧電アクチュエータの連続駆動による劣化の度合との関連について検証した。

## 【0132】

上記のようにして得られた積層型圧電アクチュエータに対して、 $170\ \text{V}$  の直流電圧を印加したところ、すべての積層型圧電アクチュエータにおいて、積層方向に  $45\ \mu\text{m}$  の変位量が得られた。さらに、この積層型圧電アクチュエータを室温で  $0 \sim +170\ \text{V}$  の交流電圧を  $150\ \text{Hz}$  の周波数で印加して、 $1 \times 10^9$  回まで連続駆動させた駆動試験を行っ

た。結果は表 2 に示すとおりである。

【表 3】

| No | 内部電極金属中のPd<br>(重量%) | 内部電極金属中のAg<br>(重量%) | 内部電極金属中のCu<br>(重量%) | 内部電極金属中のNi<br>(重量%) | 初期状態に対する<br>連続駆動後の<br>変位量変化率(%) | 劣化の度合(%) |
|----|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|----------|
| 1  | 0                   | 100                 | 0                   | 0                   | マイグレーションで破損                     | —        |
| 2  | 0.001               | 99.999              | 0                   | 0                   | 0.7                             | 0.22     |
| 3  | 0.01                | 99.99               | 0                   | 0                   | 0.7                             | 0.22     |
| 4  | 0.1                 | 99.9                | 0                   | 0                   | 0.4                             | 0.22     |
| 5  | 0.5                 | 99.5                | 0                   | 0                   | 0.2                             | 0.00     |
| 6  | 1                   | 99                  | 0                   | 0                   | 0.2                             | 0.00     |
| 7  | 2                   | 98                  | 0                   | 0                   | 0                               | 0.00     |
| 8  | 4                   | 95                  | 1                   | 0                   | 0                               | 0.00     |
| 9  | 5                   | 95                  | 0                   | 0                   | 0                               | 0.00     |
| 10 | 8                   | 92                  | 0                   | 0                   | 0                               | 0.00     |
| 11 | 9                   | 91                  | 0                   | 0                   | 0.2                             | 0.00     |
| 12 | 9.5                 | 90.5                | 0                   | 0                   | 0.2                             | 0.00     |
| 13 | 10                  | 90                  | 0                   | 0                   | 0.4                             | 0.22     |
| 14 | 15                  | 85                  | 0                   | 0                   | 0.7                             | 0.22     |
| 15 | 0                   | 0                   | 100                 | 0                   | 0.2                             | 0.00     |
| 16 | 0                   | 0                   | 99.9                | 0.1                 | 0                               | 0.00     |
| 17 | 0                   | 0                   | 0                   | 100                 | 0.4                             | 0.22     |
| 18 | 20                  | 80                  | 0                   | 0                   | 0.9                             | 0.45     |
| 19 | 30                  | 70                  | 0                   | 0                   | 0.9                             | 0.45     |

【0133】

この表 3 から、試料番号 1 は内部電極 12 を銀 100% で形成したため、シルバー・マイグレーションが起こり、積層型圧電アクチュエータの破損が発生するので、連続駆動が困難となった。

【0134】

また、試料番号 18、19 は内部電極 12 中の金属組成物において、V I I I 族金属の含有量が 15 重量% を超えており、また、I b 族金属の含有量が 85 重量% 未満であるため、連続駆動によって劣化が増大するので、積層型圧電アクチュエータの耐久性が低下した。

【0135】

これらに対して、試料番号 2 ～ 17 では内部電極 12 中の金属組成物が V I I I 族金属の含有量を M1 (重量%)、I b 族金属の含有量を M2 (重量%) としたとき、 $0 < M1 \leq 15$ 、 $85 \leq M2 < 100$ 、 $M1 + M2 = 100$  を満足する金属組成物を主成分としたため、内部電極 12 の比抵抗を小さくでき、連続駆動させても内部電極 12 で発生する発熱を抑制できたので、素子変位量が安定した積層型アクチュエータを作製できた。

【0136】

なお、本発明は、上記実施例に限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲内で種々の変更を行うことは何等差し支えない。

【図面の簡単な説明】

【0137】

【図 1】本発明の積層型圧電素子を示すもので、(a) は斜視図、(b) は圧電体層と内部電極層との積層状態を示す斜視展開図である。

【図 2】本発明の噴射装置を示す側面図である。

【符号の説明】

【0138】

- 11・・・圧電体
- 12・・・内部電極
- 13・・・積層体
- 14・・・不活性層
- 15・・・外部電極
- 31・・・収納容器
- 33・・・噴射孔
- 35・・・ニードルバルブ
- 37・・・燃料通路
- 39・・・シリンダ

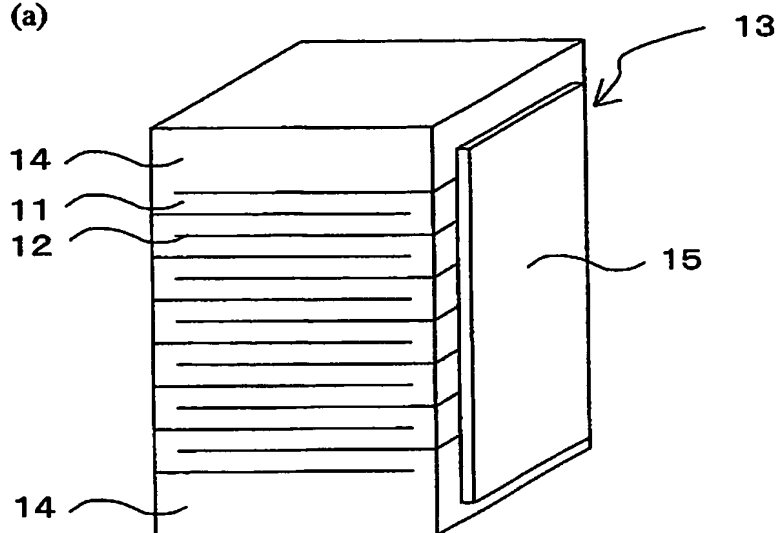
4 1 . . . ピストン

4 3 . . . 圧電アクチュエータ

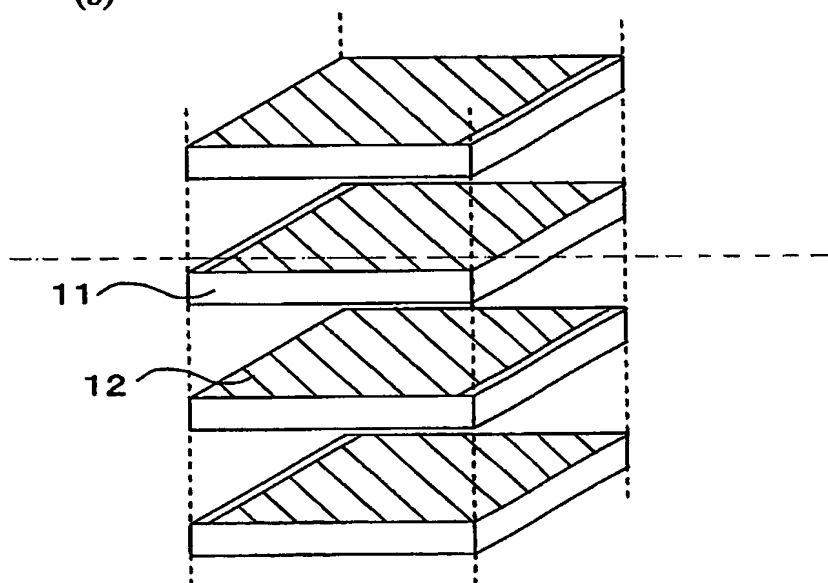
【書類名】 図面

【図 1】

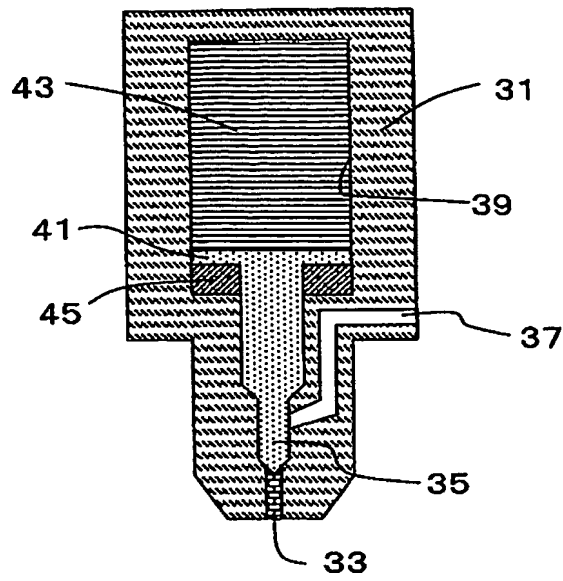
(a)



(b)



【図 2】



【書類名】要約書

【要約】

【課題】連続駆動させても、所望の変位量が実効的に変化しないために、装置が誤作動することなく、耐久性に優れた高信頼性の積層型圧電素子およびこれを用いた噴射装置を提供する。

【解決手段】少なくとも1つの圧電体と複数の内部電極とを交互に積層してなる積層体を有し、該積層体の側面に前記内部電極が一層おきに交互に接続された一对の外部電極を具備し、該外部電極に電界を印加して駆動する積層型圧電素子において、連続駆動前後の素子変位量の変化率が5%以内になるようにする。

【選択図】図1

特願 2 0 0 4 - 1 5 2 3 0 8

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [ 0 0 0 0 0 6 6 3 3 ]

1. 変更年月日 1 9 9 8 年 8 月 2 1 日

[変更理由]

住所変更

住 所

京都府京都市伏見区竹田鳥羽殿町 6 番地

氏 名

京セラ株式会社